

国外风力发电动向

(三)

浙江省电力试验研究所

一九八一年三月

目 录

一、直轴风机工作原理	92
二、风力发电机	100
三、关于直轴风机的 TROPOSIEN 型桨叶形状	111
四、风特性和风机出力	130

风机的数据收集和分析系统

提要

在能源部的赞助下，圣地亚实验室完成了一个发展立轴风机系统的计划。这个计划的一个方面是使卡特兰Kirtland空气动力基地上的圣地亚实验室的专区I已装备起来的试验基地得到了发展。现在已经有三台风机在这个试验基地运行。本文描述发展立轴风机试验基地遇到的和需要解决的数据收集与系统分析问题。此系统应用一个16位字长的小型计算机作为独立结构系统的主要元件，各种外围设备实现所要求的数据收集功能和提供显示与分析。它包括了以磁盘为基础的软件操作系统，此系统支援了大型文件存储系统，高级语言和辅助软件程序。

直轴风机工作原理

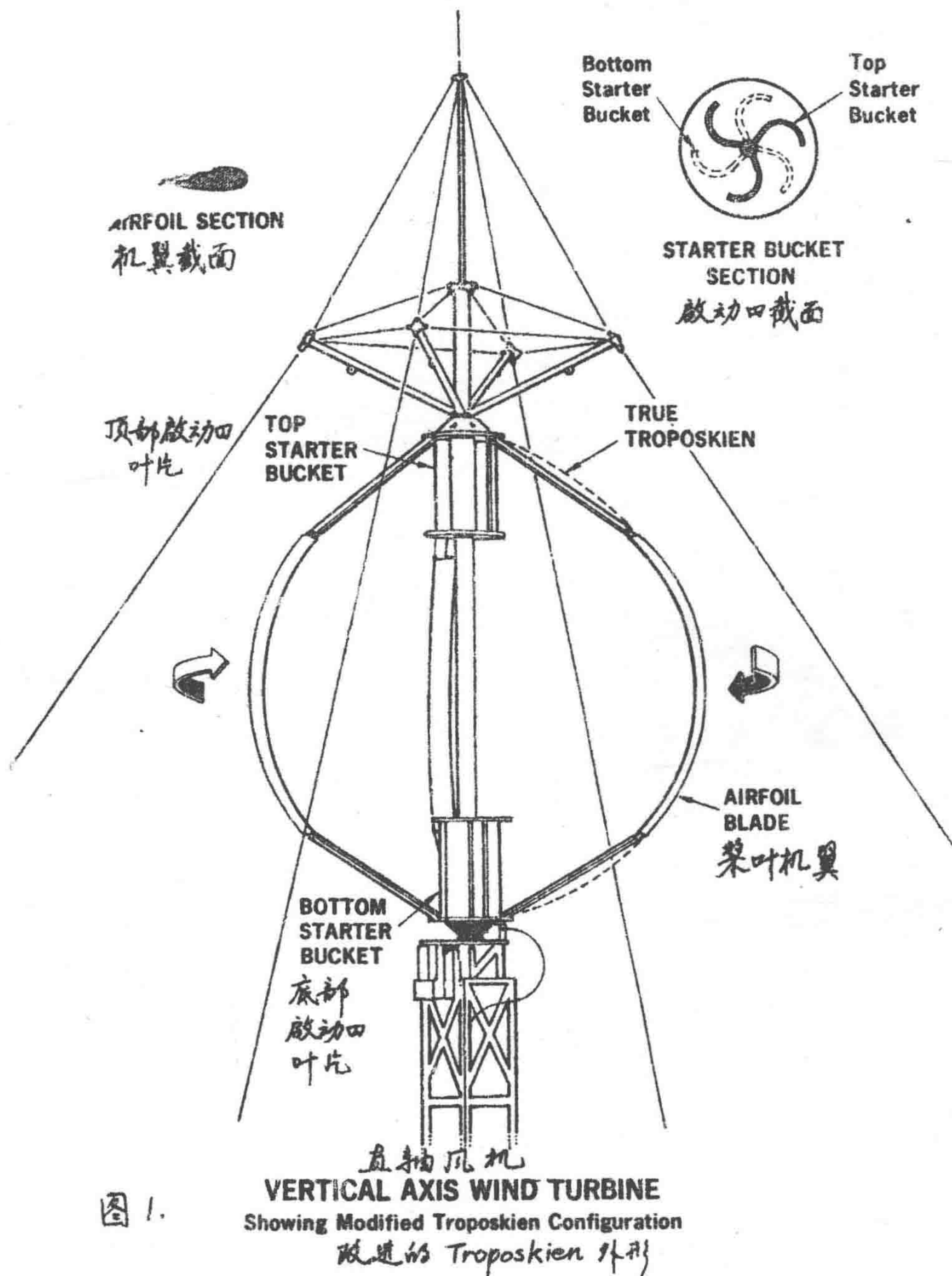
B. F. Blackwell

1925年，在法国巴 G、J、M、达里厄向美国提出申请取得“一种新型的产生动力的风车设计”专利。这一专利在1931年以1835018编号“Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to Flow of the Current.”发表。1970年初，由加拿大国家研究委员会的国家航空公司单独研制了一台相类似的风机。

图1所示，是一位专家设计的直轴风机系统。每一片桨叶是横截面对称的机翼，并弯曲成完全弯曲的绳索，其横截面图假定围绕着一垂直轴旋转。这种桨叶加工成“troposkien”（由希腊字转译来，意思是旋转的绳）形状。桨叶加工成troposkien的形状，旋转时不会引起桨叶弯曲，而且所受的力纯粹是张力。

直轴式风机与传统的螺旋桨式风机比较，表现出独特的优点：

1. 可以接受以任何方向来的风。



2. 发电机可以安装在平地上，不需要昂贵的伞形齿轮，因此允许有比较简单的塔状结构和极少的维护工作。

3. 由于简单的塔状结构和减少了桨叶制造费用，所以装置成本较低。

直轴风机的工作原理与风机机翼的空气动力学相类似，当气流通过机翼时，在机翼上产生力。这些力通常分为升力和拉力，拉力与风平行，而升力与拉力相垂直。翼弦线与风向之间的夹角称为攻角。对于对称的机翼，如图 2 所示，翼弦线与机翼横截面的中心线相重合。绝大多数机翼综合特性，是随着攻角的增大，升力对拉力的比 (L/D) 增加，但当攻角增大到某一数值时，气流从机翼上分离，这种气流分离通常属于失速。一旦攻角足够大而引起失速，则随着攻角的增加，升力对拉力的比就下降。对于最佳的空气动力学性能，这种失速状态将是可以避免的。

因为直轴风机有旋转的机翼，它出现了略微不同的情况。首先，在旋转机翼上的风力不再是简单的绝对风速，而是相对于桨叶的风速，即绝对风速 V 减去桨叶绝对速度 $R\omega$ 。这一速度矢量差如图 2 所示。对于旋转的机翼，攻角是相对风速 W 和翼弦线之间的夹角。如图 2 中所注明，攻角取决于风速 V ，桨叶旋转的速度 $R\omega$ ，和桨叶位置的角度 θ 。

图中，由 V 和 $R\omega$ 得到的 $R\omega/V$ 与桨叶在这位置的攻角约 12 度左右。对于给定的桨叶位置，其攻角随着相对旋转速度 ($R\omega/V$) 增加而减小。因此对于某一个足够高的相对旋转速度 ($R\omega/V$)，机翼旋转时决不会失速。然而在低相对旋转速度时，桨叶可能失速的范围增加。在较低的风速时桨叶就会失速。对于

低的 $R\omega/V$ 情况，空气动力学性能将是很差。

这个使桨叶旋转的力由升力 L 和拉力 D 在机翼翼弦方向上的投影所决定。升力在翼弦方向的分量趋向于使机翼反时针方向旋转，而拉力在翼弦方向的分量反抗这一运动。只要翼弦方向的升力比拉力大，这个驱动力矩始终是正的。

根据上述情况，空气动力学性能在低的相对旋转速度时是很差的，因为要引起机翼失速。

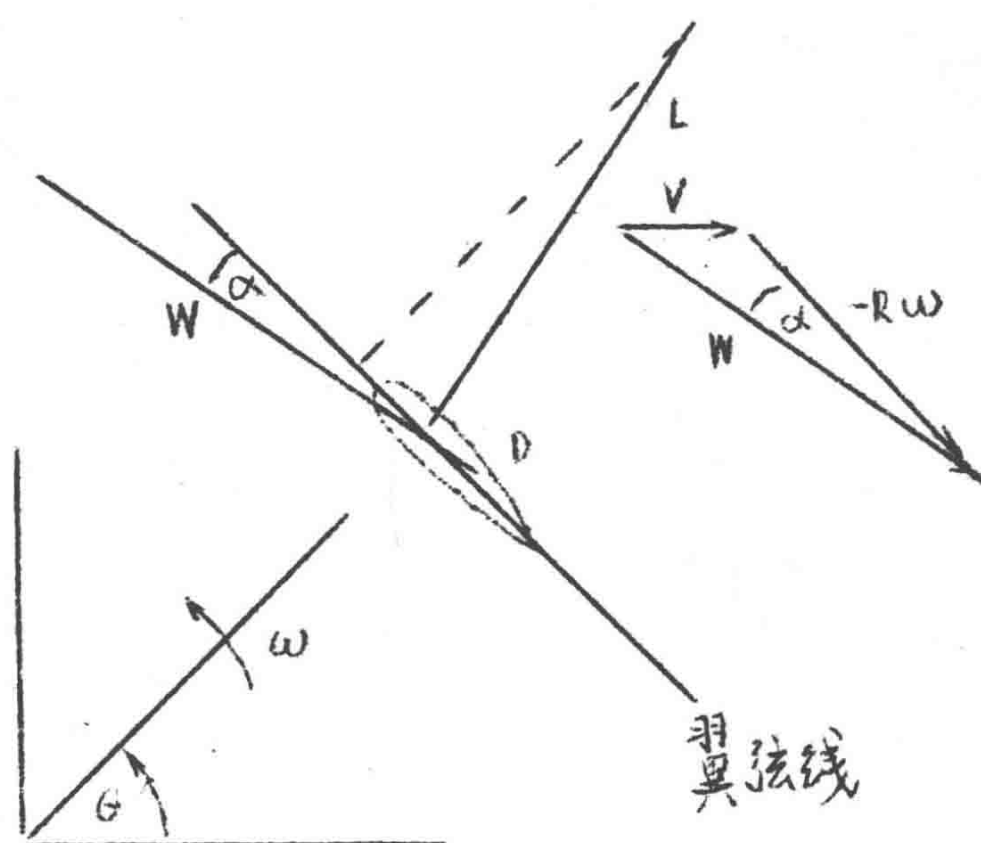


图 2 在旋转机翼上空气动力学力的作用

在高的相对旋转速度时，性能也是很差的。但它们的成因是有区别的，此时因 $R\omega/V$ 增加，攻角 α 减小。理所当然，随着 α 减小，翼弦方向的升力下降（见图 2），同样，升力对拉力的比等于零，则攻角亦为零。从上面讨论，总的空气动力学性能可概括为：差的性能出现在低的和高的相对旋转速度时；最佳性能则出现在 $R\omega/V$ 的中间值，因为此时攻角足够大，有一个高的 L/D 值，而又不致于引起失速。图 3 说明了这一性能。直轴风机的效率超过惯用的水平轴风机，利用的气流能量可达到 4.0% 以上。

由于在低的相对旋转速度时机翼失速，所以必须利用某些型式的辅助设备来启动该系统。图 1 中心轴上配置的“控序”就是作启动器用的。这些辅助设备在低的相对旋转速度时具有良好的转矩特性。一旦启动器驱动系统达到相对旋转速度为 $R\omega/V \approx 3$ ，桨叶开始驱动。启动器尺寸的选择，应在桨叶工作在最高效率的情况时，启动器亦工作在最高效率的状态。启动器的效率和桨叶的效率一起表示在图 3 中。

为了确定某风速时能产生预定输出功率的直轴风机尺寸，引用以参考文献 4 中定制来的。

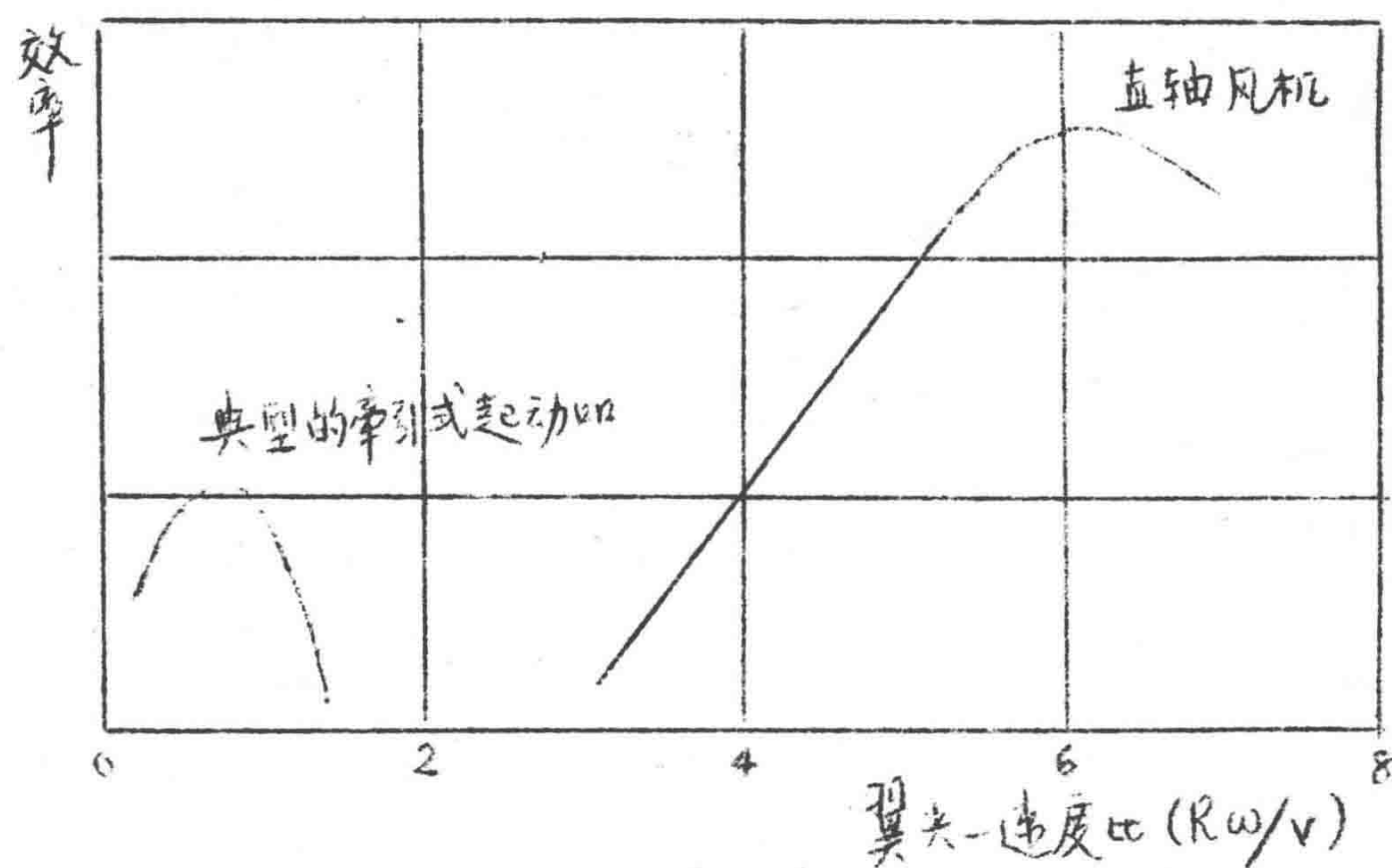


图 3 特性曲线

如图 4 所示的直轴风机特性诺模图，假定风机负荷是变化的，以便使它始终工作在最高效率的相对旋转速度 ($P\omega/V \approx 6$)

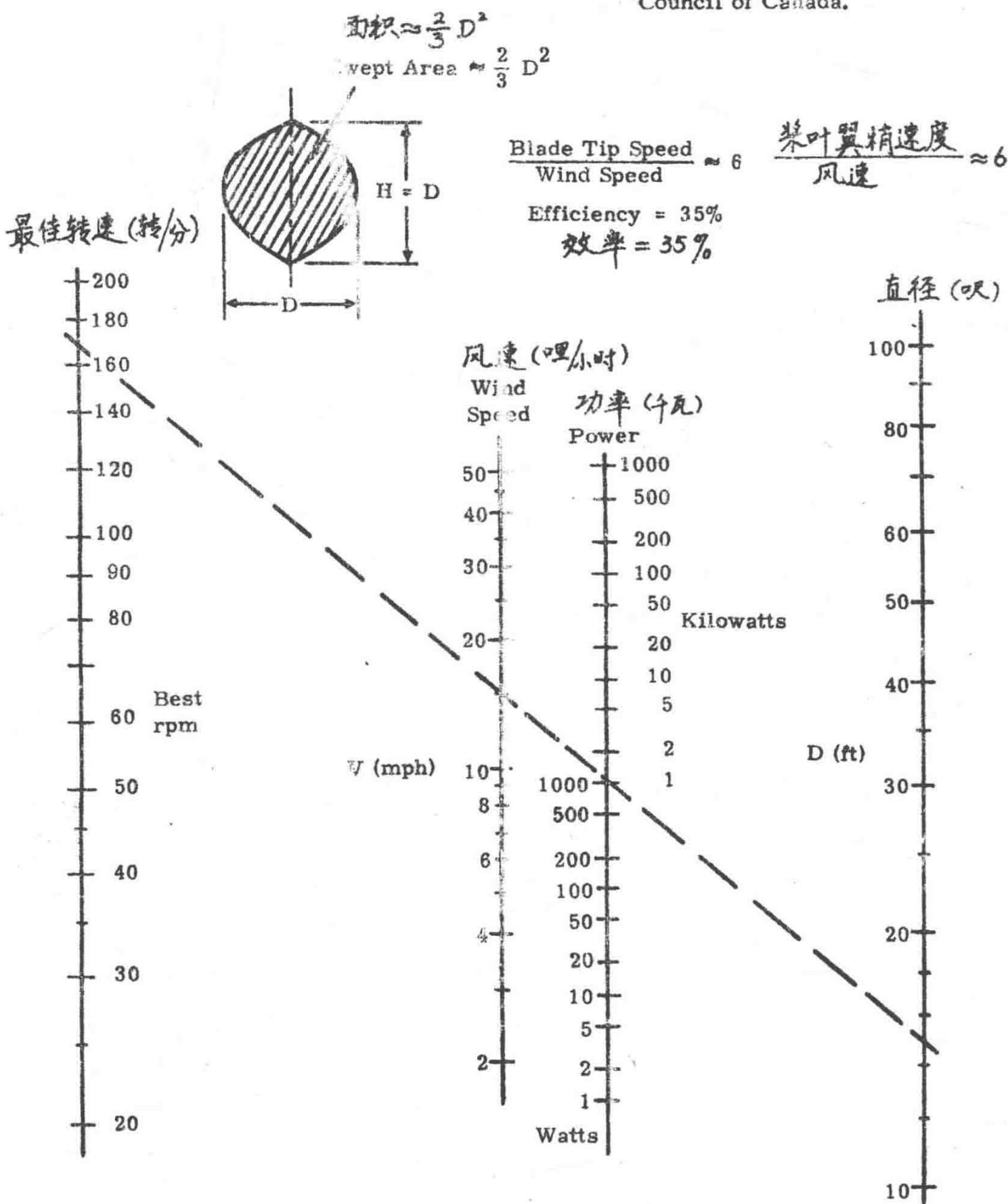


Figure 4. Vertical-Axis Wind Turbine Performance Nomogram

图 4. 直轴风机特性诺模图

参 考 文 献

1. G.J.M. Darrieus, "Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current," United States Patent No. 1,835,018, December 8, 1931.
2. P. South and R.S. Rangi, Preliminary Tests of a High Speed Vertical-Axis Windmill Model, National Research Council of Canada, LTR-LA-74, March 1971.
3. P. South and R.S. Rangi, A Wind Tunnel Investigation of a 14 Ft. Diameter Vertical-Axis Windmill, National Research Council of Canada, LTR-LA-105, September 1972.
4. P. South and R.S. Rangi, "The Performance and Economics of the Vertical-Axis Wind Turbine Developed at the National Research Council, Ottawa, Canada," Agricultural Engineer, PP. 14-16, February 1974 (see also American Society of Agricultural Engineers Paper No. PNW 73-303)
5. B.F. Blackwell and Reis, Blade Shape for a Troposkien Type of Vertical-Axis wind Turbine, SLA-74-0154, Sandia Laboratories, April 1974.

Reprinted January 1980

译自 美国圣地亚研究室风能报告

《The Vertical—Axis Wind Turbine

“How It Works”》

December 1974

浙江省电力试验研究所 张颂燕 译
王孟龙 校

风力发电机

1. 引言

IREQ 风力发动机是由电子装置和自动跟踪电路系统控制的。

此风力发动机连接一台交流发电机。当风速达到所要求时，风力发动机开始运转，交流发电机发电。

反馈装置是一个相位反馈装置。

首先要研究的问题是自动跟踪电路的稳定性问题。这个问题需用数学方程来解决；某些传递函数是线性传递函数（惯性齿轮）。

此文并将介绍自动跟踪电路中分隔电路的作用，以及精密微分频率计的原理。

2. 使用方程（图 1）

当 C_e 相位重合时，相位反馈装置就产生一个指令。

可写作： $C_e = 2\pi 60t + cte$

2.1) 元件 A 测出指令与机器角度的方位之间相位的偏差。它的传递函数是在 V/m ， K_0 的常数。

2.2) 为了便闭合电路稳定需进行必要的速度测定补偿。接收信号存储器 B 发出 ε 偏差信号。

2.3) 启用滤波器可消除 60 赫兹的频率（来自 A 相位比较器和速度测定补偿的噪音）。

传递函数可写作： $C(S) = \frac{-K_1}{1+\tau_1 S}$ (I)

在 V/U 采用 K_1 来调制闭合电路增益。

2.4) 发电机通电时, 传递函数可写作:

$$D(S) = \frac{K_2}{1 + \tau_2 S}$$

K_2 在 W/V

$\tau_2 \approx 1 \text{ scc}$

2.5) 惯性轮 E 构成存储信号和一个传递函数

P_2 表示风力发动机的功率

P_1 表示电动机的负载功率

P 表示风力发动机和电动机加快与制动惯性轮的公差

实际当中, 应计算风力发机械惯性, 发电机惯性及惯性轮惯性。

传递函数应线性化

事实上, 可得: $E = \frac{1}{2} J \omega^2$

E 表示惯性轮的能, J 表示惯性, ω 表示角频率

若 ϕ 为惯性轮的调制功率

可写作: $E(t) = E_0 + P_t$ (2)

$$= \frac{1}{2} J \omega_0^2 + P_t = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3)$$

$$\text{即: } \omega = \sqrt{\frac{2 P_t}{J} + \omega_0^2} \quad (4)$$

惯性轮的传递函数应通过近似法求得, 而不是由微分方程常数所得:

$$d\omega = \frac{P}{J\omega} dt \quad (5)$$

$$\omega \text{ 的邻域可记作 } \omega \approx \omega_0 \quad (6)$$

$$\text{进而: } d\omega \approx \frac{p}{J\omega} dt \quad (7)$$

$$\text{积分: } \omega \approx \frac{p}{J\omega_0} t + \omega_0 \quad (8)$$

惯性轮作为 ω_0 的邻域的积分 A 这一级, 如果采用电动机转矩的作功方式, 而不是采用功率功的方式, 结果为线性传递函数。

由于电动机的传递函数是电压——功率比所以不可能有近似值,

$$\text{另一方面: } ce = \int_0^t \omega(t) dt \quad (9)$$

惯性轮附合相位一次积分, 它的传递函数可写作:

$$E(s) = \frac{k_s}{s^2} \quad (10)$$

$$\text{在 } rd/w_{att} \quad k_s = \frac{1}{J\omega_0} \quad (11)$$

ce_s 表示输出相

2.6) F 速度测定补偿产生频率误差

关系式(9)可记作 F 的传递函数

$$\text{即: } F(s) = ks \quad (12)$$

k 在 Vs / rd

3. 计算断路回路的传递函数

$$\varepsilon = k_0 ce_0 - ce_s (k_0 + k_s) \quad (13)$$

$$ce_s = \left(\varepsilon \frac{k_1}{1+\tau_1 s} \times \frac{k_2}{1+\tau_2 s} + p_2 \right) \frac{k_3}{s^2} \quad (14)$$

即：

$$\varepsilon = \frac{k_0 ce_E}{1+k_0 k_1 k_2 k_3} \frac{1+(k/k_0)s}{s^2(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} - p_2 \frac{k_3}{s^2} \times \frac{k_0 + ks}{1+k_0 k_1 k_2 k_3} \frac{1+(k/k_0)s}{s^2(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)}$$

a
b

方程(14)有两项“a”项和“b”项

“a”项与最初瞬变过程发出的指令有关

“b”项与 p_2 波动有关 (p_2 为风力发动机的功率)

两项方程特点为 $1 + G(s) = 0$

$$G(s) = +k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{1 + \frac{k}{k_0} s}{s^2(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)}$$

分母是零

如果没有速度测定补偿 ($k=0$) 系统不稳定, 因为 $G(s)$ 的相位变化是在 -180° 和 -360° 之间, 要使系统稳定, $G(s)$ 相位高于 -180° (当 $G(s)$ 的模量在 1 的邻域)

实际上, 增益和相位应有限度的。数量级为 12dB, 50° 左右的范围。

在取 $\frac{k}{k_0 t_2} = 5$ 可得 42° 的相位超前

由于取 $K_0 = 0.12 V_{vd}$ $k_1 = 1$ $k_2 = 600 W/V$

$$k_s = 9.4 \times 10^{-5} \text{ rd/w} \quad \tau_1 = 0.1 \text{ s} \quad \tau_2 = 1 \text{ s},$$

图 2 是模量和切断回路的相位的限度

根据图 2 可以得出 k_s 的最大值, 即 $k_s = 63$, 在这个范围可得出 12dB 的增益限度, 然而, 相位的限度只有 21° (这是很小的), 在选 $k_s = 10$, 相位的限度就很大, 接近 40° 的满足限度, 谐振频率接近 0.45 赫兹 $\langle ce = \pi 7 \rangle$

4 实际应用

图(3)电路图用于图(1)的电子部分

由于选择 $a=5\text{V}$, 相位的调制范围集中在 $0-20\text{V}$ ($+2\pi \rightarrow 17.54\text{V}$; $-2\pi \rightarrow 2.46\text{V}$) 实际电路产生一定限定的饱和

另一方面, 转速表的误差导致相位的误差, 相位正负 π 误差, 使得转速表输出的允许误差为 377V , 或 6.3 rd/s , 包括选择增益。普通转速表不可能达到 1.7×10^{-3} 至 60 赫兹的相对误差。实际上在这种情况下下的允许误差是十分低的, 在 0.1 rd 左右。

变频器周期表 D/A 得出输出的第一个近似频率比 (图 4 和附录 A)

5. 在反馈电路中采用分频器 (图 5)

在实际当中, 相位检测器和电动机输入的饱和现象, 可以采用分频器来置换饱和。"A" 分频器用于回路增益, K 具有同样作用。

第 1、2 两结果不变

相位检测器和转速表间 K 增益饱和, 是相位和频率的 N 倍。

图 2 $G'(S)$ 相位的模量